

Progettazione Automatica di Circuiti Elettronici

Docenti: Prof. Ing. Daniela De Venuto

Prof. Ing. Giovanni Mezzina

Relazioni di laboratorio A.A. 2020/2021

Studente: Francesco Caterina (Matricola 564974)

Esercitazione 1

Estrazione dei parametri caratteristici di NMOS e PMOS realizzati in tecnologia AMS 0.8 μ m

Contents

1	Cenni Teorici ed obiettivi dell'esperienza	2
2	Caratterizzazione NMOS tecnologia AMS 0.8 μ m.....	3
2.1	Estrazione kn' per W=10 μ m, L=1 μ m.....	3
2.2	Estrazione kn' per vari valori di W ed L (parametric sweep)	5
2.3	Estrazione del λn per W=10 μ m, L=1 μ m	8
2.4	Estrazione del λn per vari valori di W, L	8
3	Caratterizzazione PMOS tecnologia AMS 0.8 μ m	11
3.1	Estrazione kp' per vari valori di W ed L (parametric sweep)	11
3.2	Estrazione del λp per vari valori di W, L	14

1 Cenni Teorici ed obiettivi dell'esperienza

I transistori di tipo MOSFET sono ad oggi largamente impiegati sia nell'ambito dei circuiti integrati digitali, che nei circuiti integrati analogici (nonché come dispositivi "singoli" nei circuiti a componenti discreti, per esempio nell'ambito dell'elettronica di potenza).

Essi tuttavia sono dei dispositivi dal funzionamento fisico relativamente complesso, che deve tener conto di complessità sempre maggiori man mano che si scende con la miniaturizzazione del dispositivo (per esempio man mano che si scende al di sotto di un certo livello di miniaturizzazione si deve tener sempre più conto degli **effetti di canale corto**, come per esempio la **saturazione della velocità di deriva** dovuta al fatto che quando il canale è molto corto viene superato nel dispositivo il valore di campo elettrico critico (E_c) oltre il quale la velocità di deriva non varia più linearmente col campo elettrico, dandoci fisicamente nella realtà una I_d molto più elevata rispetto a quella che ci aspetteremmo con i modelli di base che non tengono conto di tale effetto).

Per studiare i MOS dal punto di vista del loro comportamento elettrico in un circuito (andamenti tensioni e correnti) senza dover tener conto della realtà fisica sottostante si sono dunque sviluppati vari modelli, che tuttavia in quanto tali non rispecchiano completamente la realtà fisica: essi valgono soltanto entro certe condizioni di validità del modello, e quando queste non vengono rispettate i risultati da esso forniti tendono a divergere da quelli della realtà fisica.

In ordine di complessità crescente, elenchiamo alcuni modelli SPICE utilizzati per la simulazione dei MOSFET mediante tools di EDA (Electronic Design Automation):

- Modello SPICE di livello 1
- Modello SPICE di livello 2
- Modello SPICE di livello 3
- Modello BSIM

Noi utilizzeremo per le nostre simulazioni in PSPICE il modello SPICE di livello 2; questo modello tuttavia non include alcuni parametri per noi importanti, quali il K' (parametro di transconduttanza) ed il λ (parametro di modulazione della lunghezza di canale).

Obiettivo dell'esperienza è quindi l'estrazione dei parametri caratteristici del MOSFET, K' e λ , per il PMOS e per l'NMOS, in modo da poter successivamente utilizzare tali parametri nei calcoli a mano nei modelli di piccolo segnale del primo ordine a cui siamo abituati, in modo da poter confrontare i risultati ottenuti con le simulazioni nelle successive esperienze con quelli dei calcoli a mano sui modelli del primo ordine.

Ovviamente i risultati ottenuti mediante calcoli manuali saranno meno precisi rispetto a quelli ottenuti con il simulatore PSPICE, in quanto esso utilizza un modello di ordine successivo, meglio approssimato, rispetto a quello che utilizziamo nei calcoli a mano, che altro non è che uno sviluppo in serie di Taylor arrestato al primo ordine dell'espressione della I_d nel punto di lavoro, dunque meno preciso rispetto ad un modello di ordine successivo al primo come quello utilizzato nel simulatore circuitale PSPICE in quanto non tiene conto degli effetti dei termini di ordine successivo al primo.

La tecnologia di riferimento per cui stiamo effettuando le estrazioni è la AMS 0.8 μ m, che verrà utilizzata poi anche nelle esperienze successive.

2 Caratterizzazione NMOS tecnologia AMS 0.8μm

2.1 Estrazione k'_n per $W=10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$

Per poter estrarre il parametro k'_n (A/V^2) dobbiamo fare riferimento all'equazione di corrente relativa alla zona lineare di funzionamento del NMOS, che ricordiamo essere:

$$\text{Corrente di drain (in triodo)} \quad i_D = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] \quad 0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

Ponendo V_{ds} molto basso, in modo da essere in regione di triodo (es $V_{ds} = 0.3\text{mV}$) ed effettuando due misure sulla caratteristica di ingresso $I_d(V_{gs})$, una in V_{gs1} ed una in V_{gs2} (a cui corrisponderanno due differenti correnti I_{d1} , I_{d2}) potremo scrivere:

$$i_{d1} = \frac{W}{L} * K'_n * [(v_{gs1} - V_{tn}) * V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}]$$

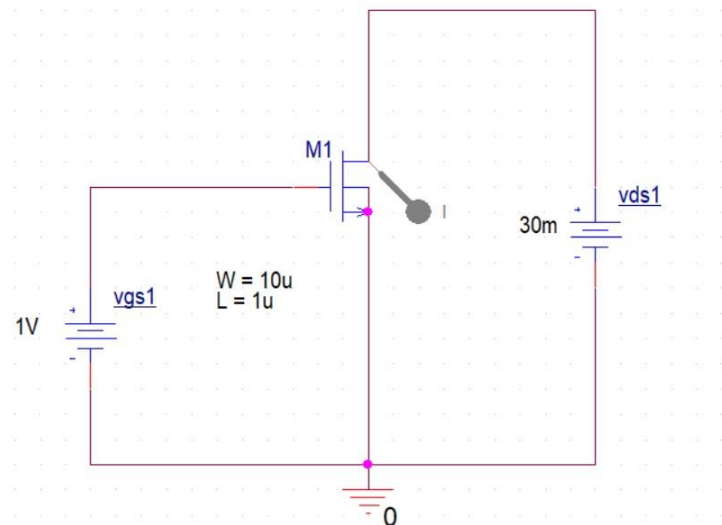
$$i_{d2} = \frac{W}{L} * K'_n * [(v_{gs2} - V_{tn}) * V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}]$$

$$\Delta i_d = \frac{W}{L} * K'_n * \Delta v_{gs} * V_{ds}$$

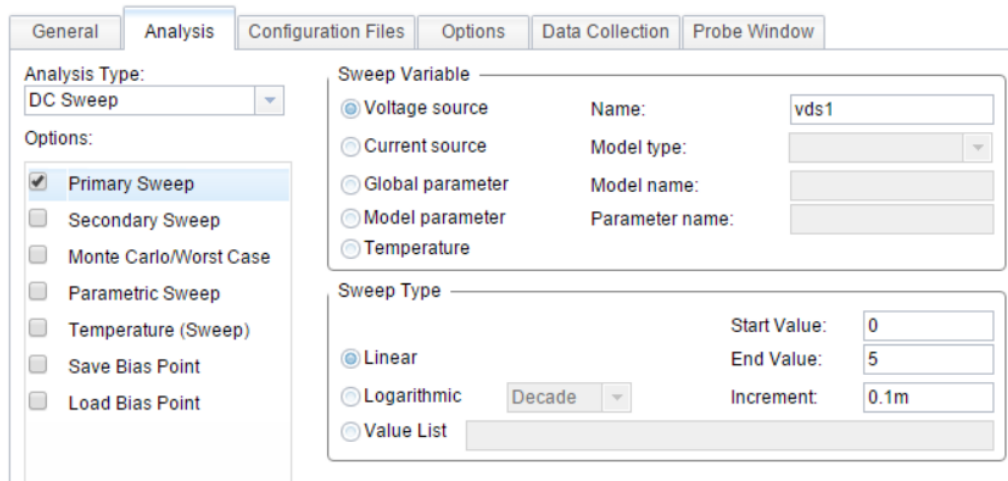
$$K'_n = \frac{1}{\frac{W}{L} * V_{ds}} * \frac{\Delta i_d}{\Delta v_{gs}}$$

In tal modo potremo calcolare il K'_n relativo al dispositivo in questione andando ad effettuare due misure di corrente (I_{d2} , I_{d1}) e due misure di tensioni (V_{gs2} , V_{gs1}) sulla caratteristica di ingresso $I_d(V_{gs})$, calcolando poi le relative differenze (cosa che fa già il software in automatico se utilizziamo il metodo dei due cursori) ed applicando infine la formula sopra ricavata.

Il circuito da utilizzare per le misure è sotto riportato.

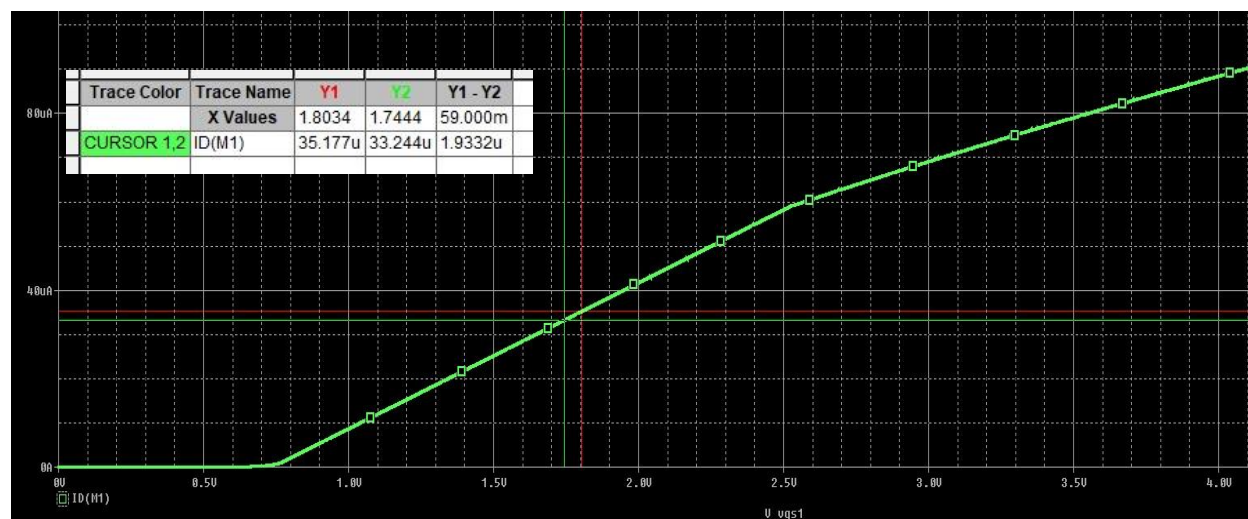


Mantenendo costante la $V_{ds1} = 30\text{mV}$ (in modo da restare sicuramente in triodo) e facendo variare il generatore V_{gs1} mediante un **DC Sweep** da 0V a 5V con step di 0.1mV, otterremo la caratteristica di ingresso $I_d(V_{gs})$ dell'NMOS, su cui poi potremo andare a fare le misure richieste.



Effettuando le misure con il metodo dei due cursori sulla caratteristica risultante da tale simulazione, il software ci dà già la variazione di corrente ΔI_d (misurata sulla curva $I_d(V_{gs})$) relativa alla variazione di tensione ΔV_{gs} (quest'ultima da noi impostata quando andiamo a posizionare i cursori).

Sotto è riportata caratteristica ottenuta e le misure su di essa effettuate.



DC Sweep di V_{gs} per $W=10\mu$, $L=1\mu$

Abbiamo una sulle ordinate una $\Delta I_d = 1.93\mu\text{A}$ a fronte di una variazione di tensione $\Delta V_{gs} = 59\text{mV}$ sulle ascisse. Essendo $W/L = 10$ e $V_{ds} = 30\text{mV}$, abbiamo:

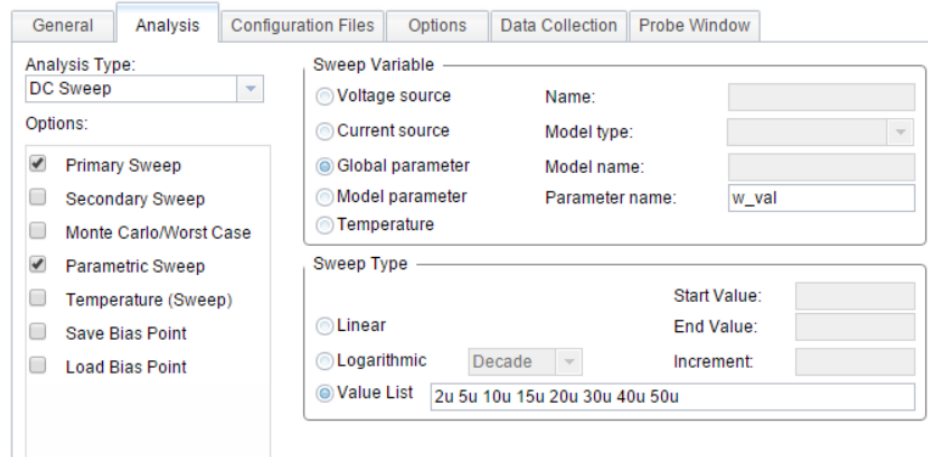
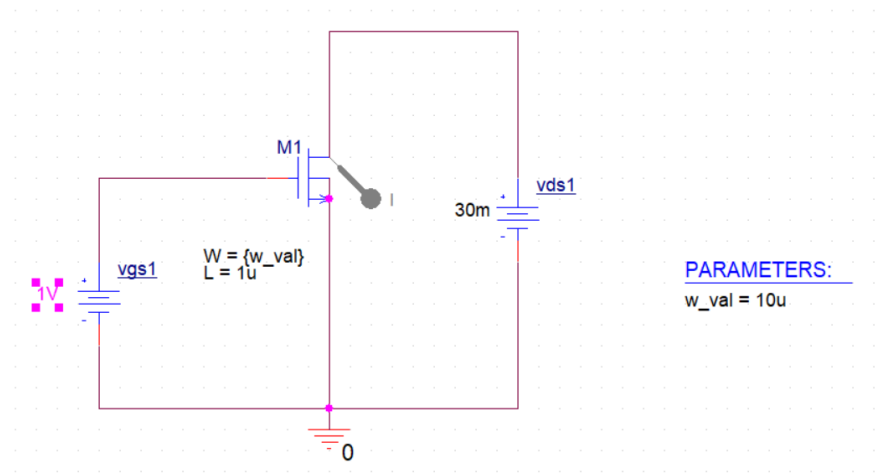
$$k'_n = \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right) * V_{ds}} \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} = \frac{1}{10 * 30 * 10^{-3}[\text{V}]} \frac{1.93 * 10^{-6}[\text{A}]}{59 * 10^{-3}[\text{V}]} \approx 110\mu\text{A}/\text{V}^2$$

2.2 Estrazione k'_n per vari valori di W ed L (parametric sweep)

Ora lo stesso risultato ottenuto per $L=1\mu\text{m}$, $W=10\mu\text{m}$, possiamo generalizzarlo per diversi valori di W (mantenendo per ora la lunghezza L costante).

Basta applicare alla simulazione sopra effettuata (sweep di V_{gs} , misura di I_d) una ulteriore parametric sweep, in cui facciamo variare la larghezza W con valori da noi scelti.

Ciò è possibile utilizzando il blocco "PARAM" preso dalla categoria "SPECIAL" della libreria di Orcad Capture. Esso permette di esporre un qualunque parametro circuitale (in questo caso il W dell'NMOS) come un **parametro globale** di cui poi potremo andare a fare lo sweep parametrico come sotto mostrato:

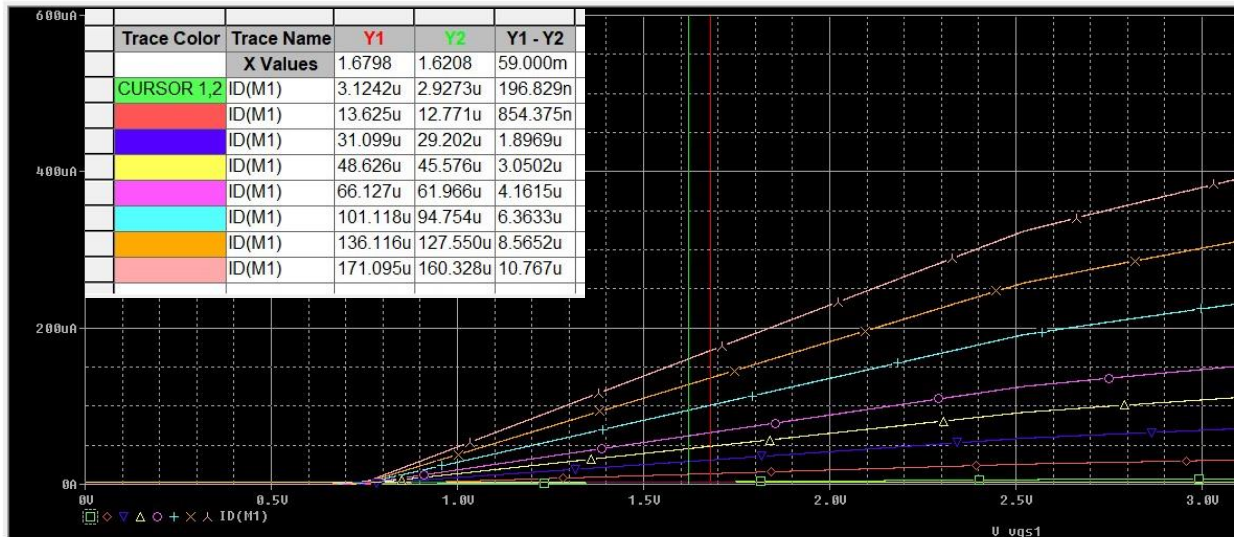


Il primary sweep ovviamente va lasciato attivo (altrimenti la tensione V_{gs} non varia).

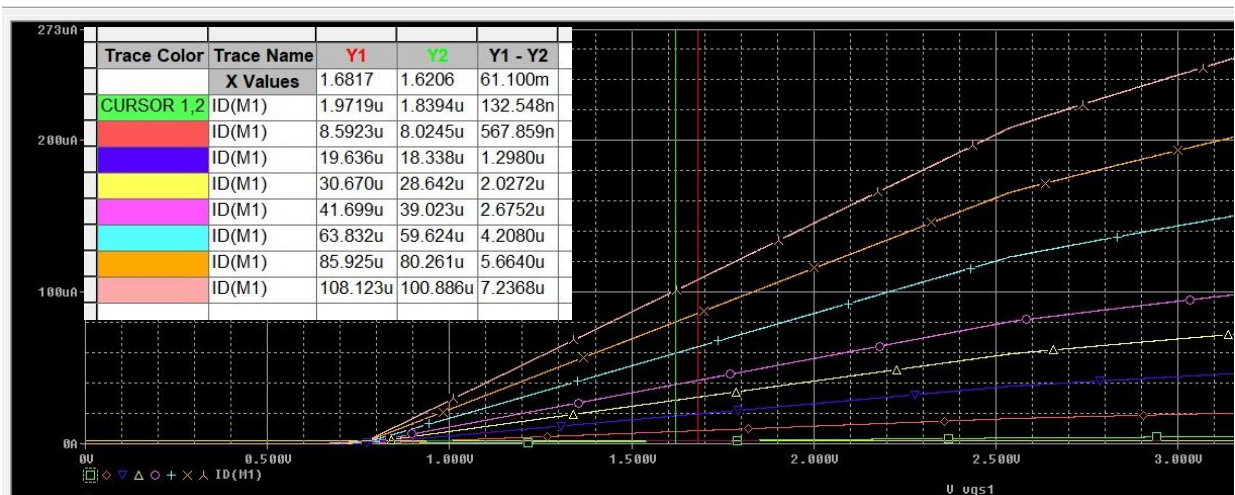
I valori di W per cui è stato effettuato il parametric sweep sono:

$W = 2u\ 5u\ 10u\ 15u\ 20u\ 30u\ 40u\ 50u$

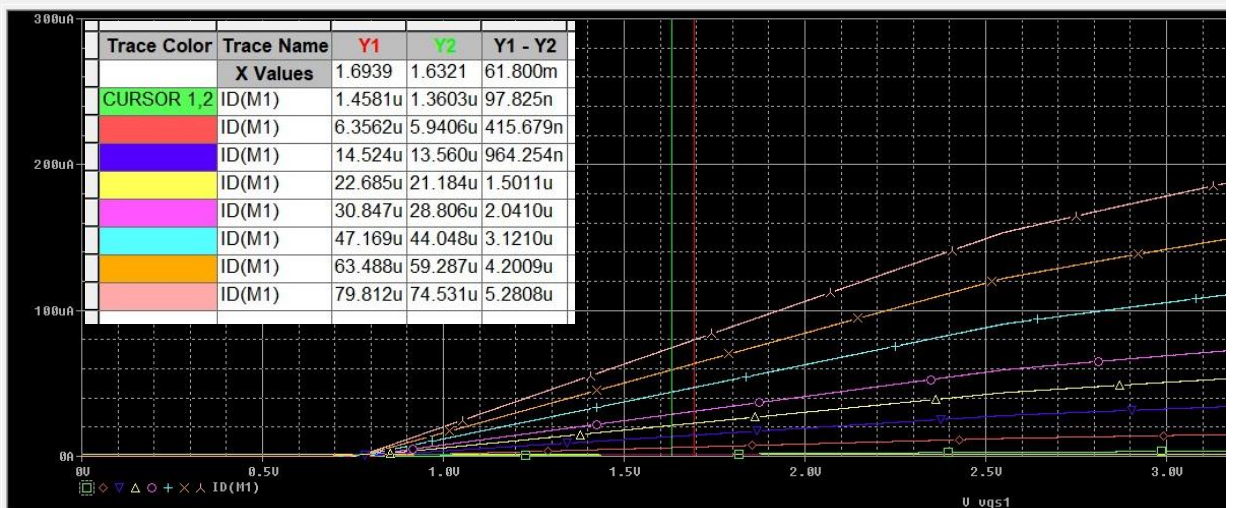
Mentre per questa simulazione abbiamo posto $L=1\mu\text{m}$, possiamo effettuare la stessa procedura per vari valori di L, questa volta variandone il valore manualmente, ponendo $L=1.5\mu\text{m}$ ed $L=2\mu\text{m}$, in modo da coprire vari valori di **aspect ratio** nelle nostre misure. I risultati delle simulazioni sono riportati nella pagina successiva.



DC Sweep di Vgs + Parametric Sweep di W per L=1μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm



DC Sweep di Vgs + Parametric Sweep di W per L=1.5μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm



DC Sweep di Vgs + Parametric Sweep di W per L=2μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm

I risultati ottenuti possiamo inserirli in un foglio di calcolo Excel, in cui andremo poi a calcolare il k'_n relativo a ciascun aspect ratio W/L. La V_{ds} è sempre rimasta costante, nella formula saranno da considerare solo i cambiamenti di W/L, ΔI_d (misurata da Y1-Y2) e ΔV_{gs} .

Sotto riporto i calcoli effettuati con Excel.

Aspect Ratio W/L for different W, L values									
W	L	2	5	10	15	20	30	40	50
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
	1,5	1,33	3,33	6,67	10,00	13,33	20,00	26,67	33,33
	2	1	2,5	5	7,5	10	15	20	25

ΔI_d for L=1u and different values of W

V_{ds}	3,00E-02								
L=1u	1								
$\Delta V_{gs}=59m$	5,90E-02								
		1,97E-07	8,54E-07	1,90E-06	3,05E-06	4,16E-06	6,36E-06	8,56E-06	1,08E-05

ΔI_d for L=1.5u and different values of W

V_{ds}	3,00E-02								
L=1u	1,5								
$\Delta V_{gs}=59m$	6,11E-02								
		1,33E-07	5,68E-07	1,30E-06	2,03E-06	2,67E-06	4,21E-06	5,66E-06	7,23E-06

ΔI_d for L=2u and different values of W

V_{ds}	3,00E-02								
L=1u	2								
$\Delta V_{gs}=59m$	6,18E-02								
		9,78E-08	4,16E-07	9,64E-07	1,50E-06	2,04E-06	3,12E-06	4,20E-06	5,28E-06

Acquisizioni misure e definizione aspect ratio W/L

Kn computation from the measurements								
	W=2u	W=5u	W=10u	W=15u	W=20u	W=30u	W=40u	W=50u
L=1u	5,56E-05	9,65E-05	1,07E-04	1,15E-04	1,18E-04	1,20E-04	1,21E-04	1,22E-04
L=1.5u	5,42E-05	9,29E-05	1,06E-04	1,11E-04	1,09E-04	1,15E-04	1,16E-04	1,18E-04
L=2u	5,28E-05	8,97E-05	1,04E-04	1,08E-04	1,10E-04	1,12E-04	1,13E-04	1,14E-04

Calcolo kn' con la formula nota, utilizzando i dati nelle tabelle sopra

I risultati ottenuti sono in linea con quanto ci aspettavamo. Per $W=15\mu m$ ed $L=1.5\mu m$ si ha all'incirca lo stesso kn' che si ha con $W=10$, $L=1$ (kn' circa $110 mA/V^2$). Quel che conta in pratica è l'aspect ratio W/L del MOS.

Si noti che kn' con i valori di W/L dati varia da un minimo di $52 mA/V^2$ ad un massimo di $122 mA/V^2$.

2.3 Estrazione del λ_n per $W=10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$

Per estrarre il fattore di modulazione della lunghezza di canale (che è il fenomeno fisico che ci dà una resistenza di uscita finita, seppur molto alta, nei MOS) dobbiamo lavorare sulla caratteristica di uscita $I_d(V_{ds})$.

Il circuito è lo stesso dell'analisi precedente, con i generatori V_{gs1} e V_{ds1} e si misura la I_d , tuttavia questa volta rendiamo la V_{gs1} costante (poniamo $V_{gs1} = 2\text{V}$ per esempio) e facciamo un DC Sweep della V_{ds1} .

Dopodichè dalla formula della $I_d(V_{gs}, V_{ds})$ in regione di **saturazione**, considerati due diversi punti ($I_{d'}$, $V_{ds'}$) e ($I_{d''}$, $V_{ds''}$) della caratteristica otteniamo:

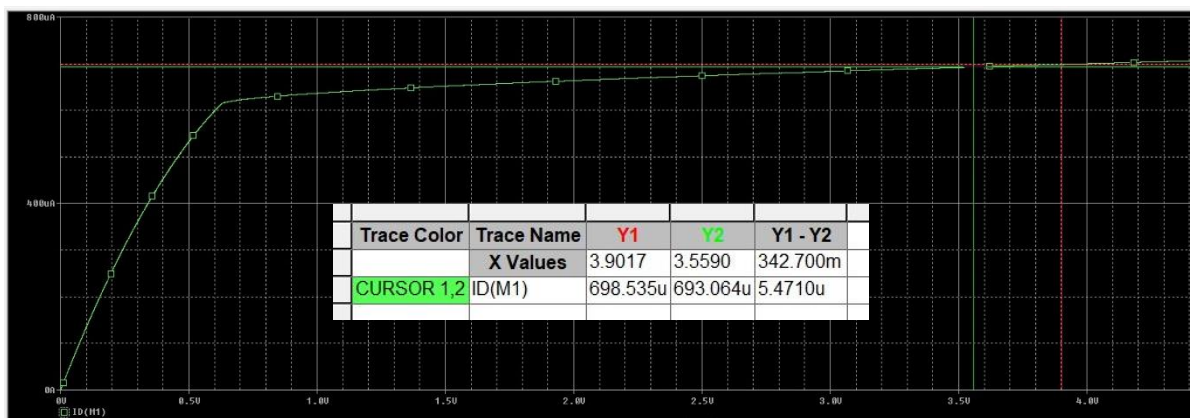
$$I_{d1} = \frac{1}{2} * \frac{W}{L} * K'_n * (V_{gs} - V_{tn})^2 * (1 + \lambda_n * V_{ds1})$$

$$I_{d2} = \frac{1}{2} * \frac{W}{L} * K'_n * (V_{gs} - V_{tn})^2 * (1 + \lambda_n * V_{ds2})$$

$$\lambda_n = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{ds}} * \frac{2}{K'_n * \frac{W}{L} * (V_{gs} - V_{tn})^2}$$

$$\Delta I_d = \frac{1}{2} * \frac{W}{L} * K'_n * (V_{gs} - V_{tn})^2 * \lambda_n * \Delta V_{ds}$$

La relazione trovata permette di calcolare il fattore di modulazione della lunghezza di canale semplicemente misurando il rapporto $\Delta I_d / \Delta V_{ds}$; tuttavia questa misura dev'esser fatta sta volta in zona di saturazione spinta, cioè abbastanza oltre l'inizio della saturazione, ed inoltre dobbiamo già conoscere la V_{gs} a cui è stata effettuata la misura (abbiamo posto $V_{gs}=2\text{V}$) ed il k'_n relativo al W/L considerato (non è un problema, in quanto abbiamo già estratto nell'esperienza precedente i k'_n per i W/L che ci interessano). Nella figura sotto il grafico della caratteristica per l'estrazione per $W=10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$.

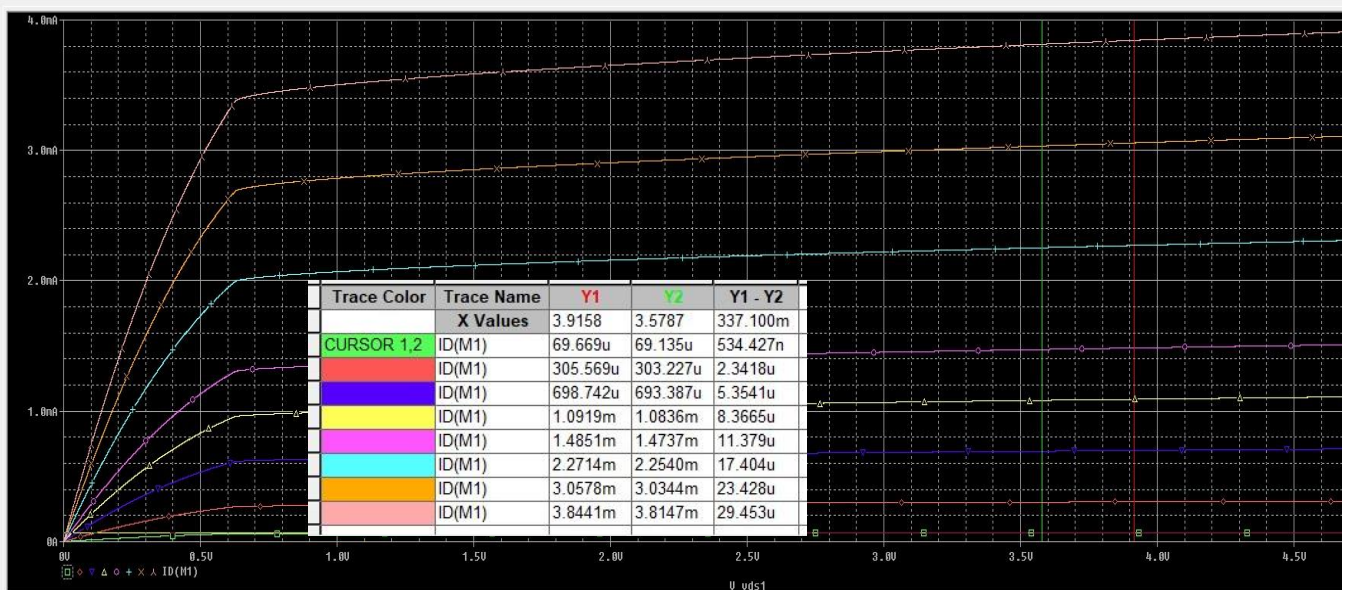


$I_d(V_{ds})$ per $V_{gs}=2\text{V}$, $W=10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$

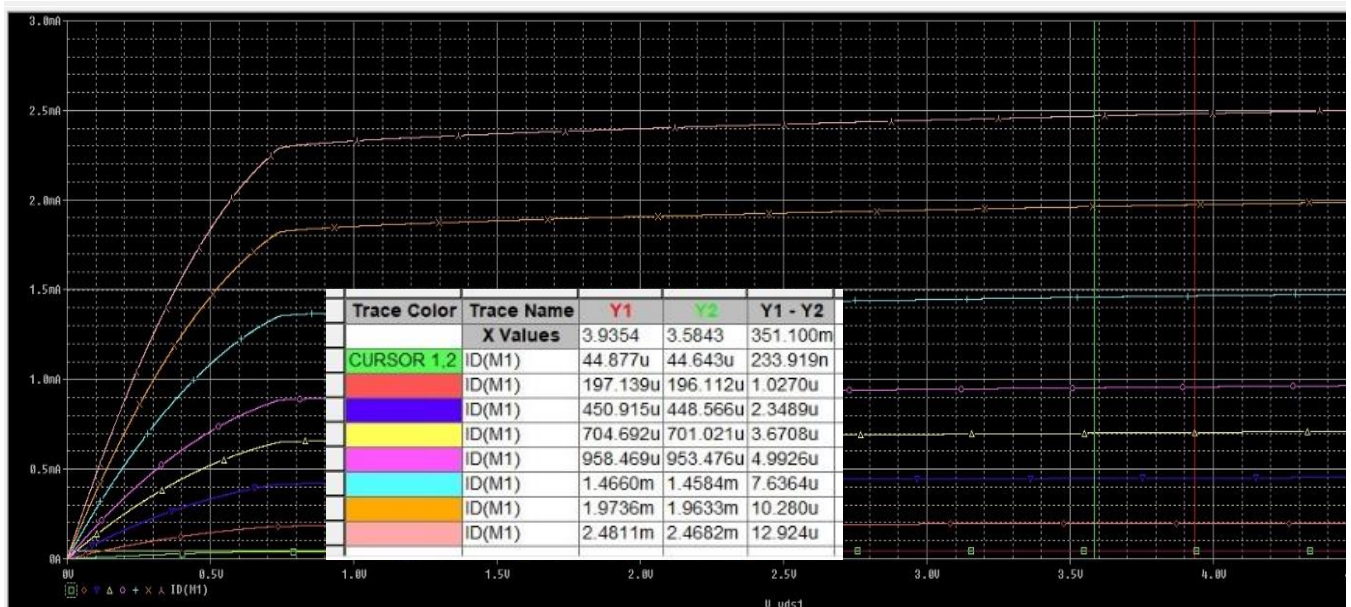
2.4 Estrazione del λ_n per vari valori di W , L

Anzichè calcolare il singolo valore di λ_n per $W=10\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$, facciamo la parametric sweep di W per $L=1\mu\text{m}$, poi per $L=1.5\mu\text{m}$ e infine per $L=2\mu\text{m}$, ed elaboriamo poi tutti i dati con un foglio Excel simile a quello utilizzato per il calcolo del k'_n al variare di W ed L .

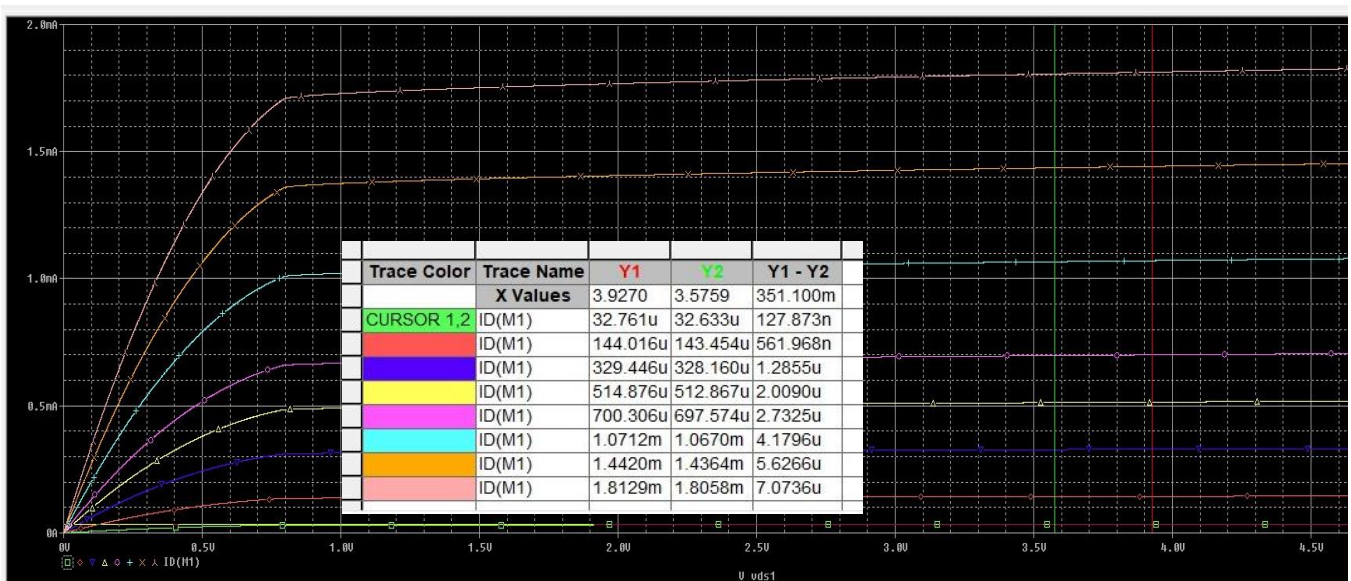
Alla pagina successiva riportiamo le caratteristiche ottenute, con le relative misure (i valori di W sono gli stessi utilizzato per le estrazioni di k'_n).



Caratteristica $I_d(V_{ds})$ per $V_{gs}=2V$, $L=1\mu m$, W Sweep



Caratteristica $I_d(V_{ds})$ per $V_{gs}=2V$, $L=1.5\mu m$, W Sweep



Caratteristica $I_d(V_{ds})$ per $V_{gs}=2V$, $L=2\mu m$, W Sweep

Aspect Ratio W/L for different W, L values (for view purposes only)

W	L								
		2	5	10	15	20	30	40	50
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
	1,5	1,33	3,33	6,67	10,00	13,33	20,00	26,67	33,33
	2	1	2,5	5	7,5	10	15	20	25

Kn computation from the measurements

	W=2u	W=5u	W=10u	W=15u	W=20u	W=30u	W=40u	W=50u
L=1u	5,56E-05	9,65E-05	1,07E-04	1,15E-04	1,18E-04	1,20E-04	1,21E-04	1,22E-04
L=1.5u	5,42E-05	9,29E-05	1,06E-04	1,11E-04	1,09E-04	1,15E-04	1,16E-04	1,18E-04
L=2u	5,28E-05	8,97E-05	1,04E-04	1,08E-04	1,10E-04	1,12E-04	1,13E-04	1,14E-04

Tabella misure Δid per vari valori di W ed L. Per L costante, ΔVds è costante (indicato a fianco)

	Vgs	2		Vtn	0,77					
L (um)	ΔVds	2	5	10	15	20	30	40	50	
1	0,3371	5,34E-07	2,34E-06	5,35E-06	8,36E-06	1,14E-05	1,74E-05	2,34E-05	2,95E-05	
1,5	0,3511	2,34E-07	1,02E-06	2,35E-06	3,67E-06	5,00E-06	7,64E-06	1,03E-05	1,29E-05	
2	0,3511	1,28E-07	5,62E-07	1,28E-06	2,00E-06	2,73E-06	4,18E-06	5,63E-06	7,07E-06	

Calcolo lambdan dalle misure di $I_d(Vds)$ sopra

L									
W		2	5	10	15	20	30	40	50
	1	1,88E-02	1,90E-02	1,95E-02	1,90E-02	1,90E-02	1,90E-02	1,90E-02	1,90E-02
	1,5	1,22E-02	1,24E-02	1,25E-02	1,25E-02	1,29E-02	1,25E-02	1,25E-02	1,23E-02
	2	9,13E-03	9,44E-03	9,27E-03	9,31E-03	9,34E-03	9,35E-03	9,36E-03	9,35E-03

La V_{tn} (tensione di soglia) è stata prelevata dal modello PSPICE del componente. Si noti che il fattore di modulazione di lunghezza del canale cambia sensibilmente solo al variare di L, mentre varia di poco al variare di W.

Nello specifico, si ha:

- per $L=1\mu m$, $\lambda_n \simeq 19 * 10^{-3} V^{-1}$
- per $L=1.5\mu m$, $\lambda_n \simeq 12,5 * 10^{-3} V^{-1}$
- per $L=2\mu m$, $\lambda_n \simeq 9,3 * 10^{-3} V^{-1}$

Dunque è L ad influenzare maggiormente λ_n e ciò è intuibile, in quanto appunto λ_n rappresenta il fattore di modulazione della lunghezza di canale, dipenderà appunto dalla lunghezza di “default” del canale prima del pinch-off (che è appunto L).

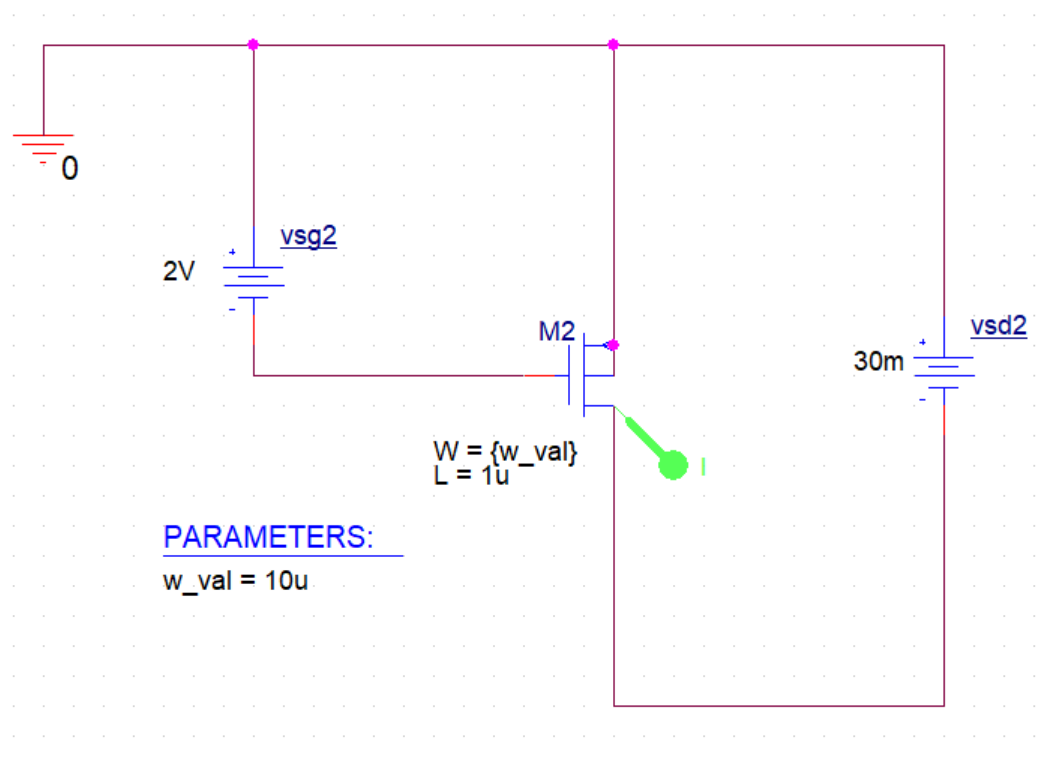
3 Caratterizzazione PMOS tecnologia AMS 0.8μm

Effettuiamo ora per il PMOS le stesse estrazioni fatte per l'NMOS. Questa volta ovviamente omettiamo gli step intermedi e facciamo direttamente le estrazioni per vari valori di W, L con gli sweep parametrici.

L'unica cosa che cambierà sarà il circuito (le tensioni vanno orientate in modo da polarizzare in maniera corretta il PMOS) e alcune grandezze nelle formule (es Vsg al posto di Vgs, Vsd al posto di Vds, il modulo di Vtn anziché Vtn).

3.1 Estrazione k'_p per vari valori di W ed L (parametric sweep)

Il circuito utilizzato a tale fine è il seguente.

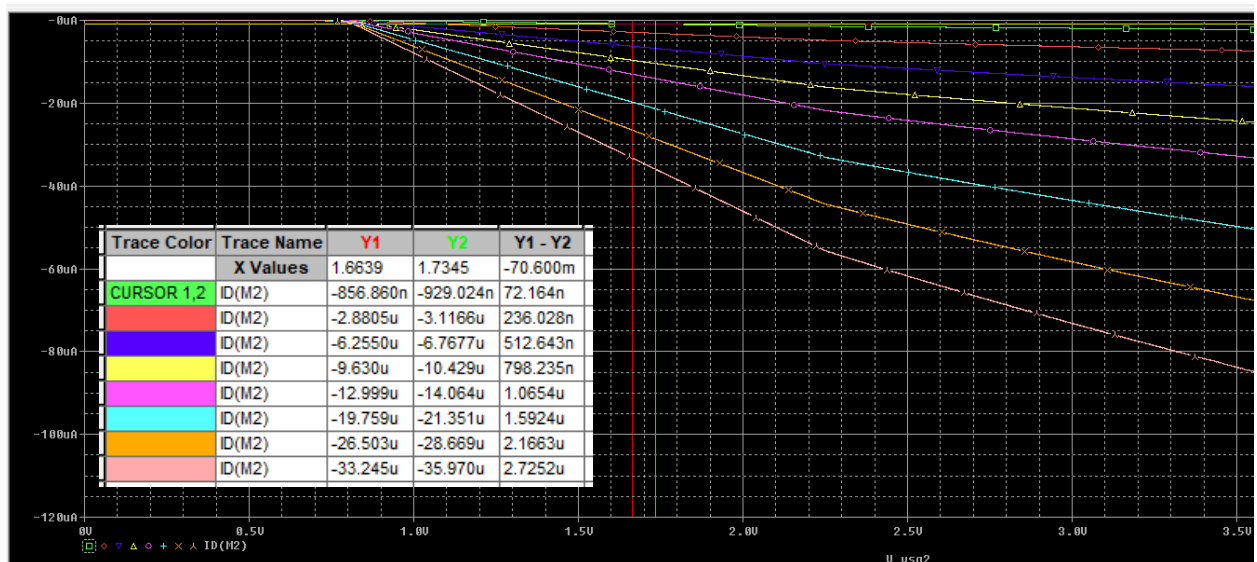


Fra source e gate è applicata la tensione Vsg2, mentre tra source e drain la Vsd2. Il bulk è connesso al source, e quest'ultimo funge da punto di riferimento per le tensioni (ground). La probe è posta sul drain.

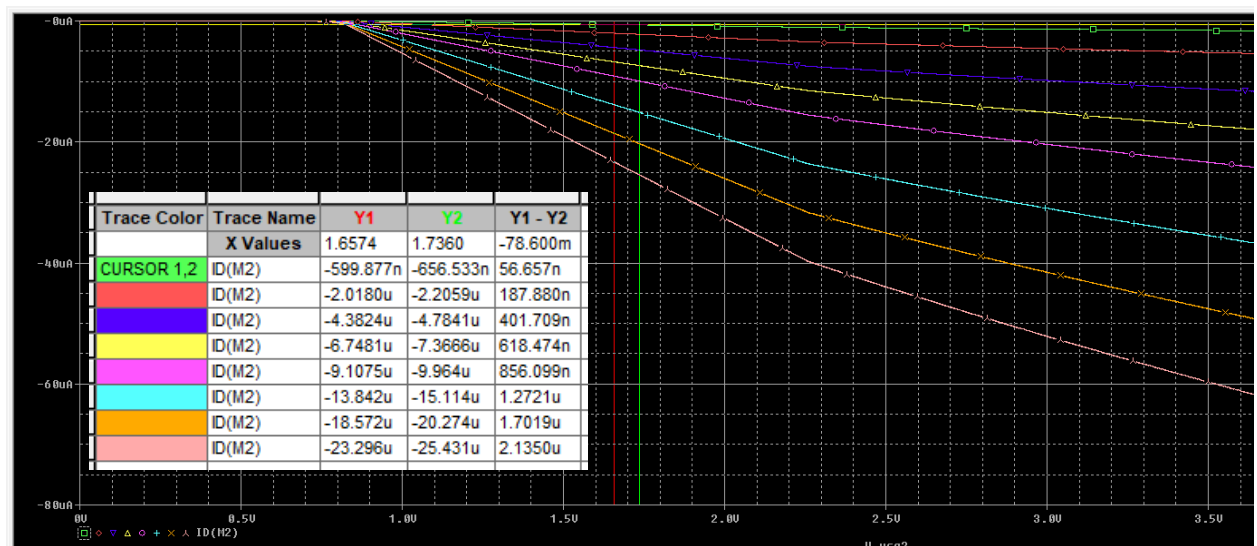
Utilizziamo una DC Sweep di Vsg2 (mentre Vsd2 è costante, pari a 30mV) per estrarre il k'_p , e applichiamo anche una parametric sweep per far variare W (con gli stessi valori discreti utilizzati per l'NMOS). L invece resta costante, L=1μm.

Riportiamo a pagina successiva le misure fatte. La formula per ricavare il k'_p dalle misure fatte sarà la seguente (si ricava con lo stesso ragionamento fatto per l'NMOS):

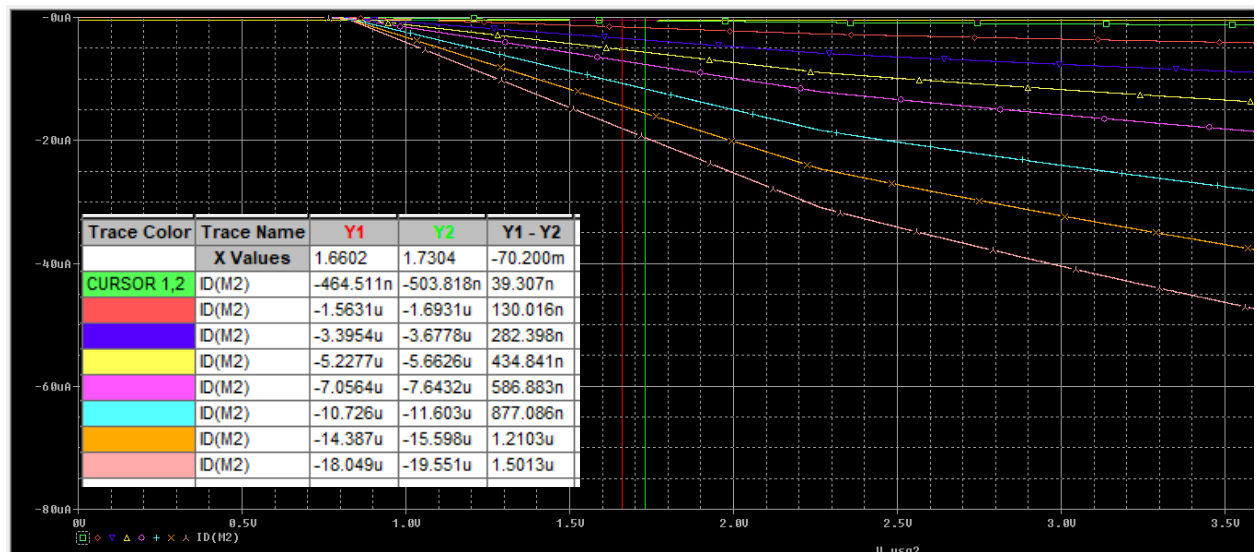
$$k'_p = \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right) * V_{sd}} \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{sg}}$$



DC Sweep di Vsg + Parametric Sweep di W per L=1μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm



DC Sweep di Vsg + Parametric Sweep di W per L=1.5μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm



DC Sweep di Vsg + Parametric Sweep di W per L=2μm. Verde-> W=2μm; Rosa-> W=50μm

Aspect Ratio W/L for different W, L values									
W	L	2	5	10	15	20	30	40	50
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
	1,5	1,33	3,33	6,67	10,00	13,33	20,00	26,67	33,33
	2	1	2,5	5	7,5	10	15	20	25

ΔI_d for L=1u and different values of W

Vds	3,00E-02								
L=1u	1								
ΔV_{sg}	7,06E-02								
		7,22E-08	2,36E-07	5,13E-07	7,98E-07	1,06E-06	1,59E-06	2,17E-06	2,72E-06

ΔI_d for L=1.5u and different values of W

Vds	3,00E-02								
L=1u	1,5								
ΔV_{sg}	7,86E-02								
		5,67E-08	1,88E-07	4,02E-07	6,18E-07	8,56E-07	1,27E-06	1,70E-06	2,13E-06

ΔI_d for L=2u and different values of W

Vds	3,00E-02								
L=1u	2								
ΔV_{sg}	7,02E-02								
		3,93E-08	1,30E-07	2,82E-07	4,35E-07	5,87E-07	8,77E-07	1,21E-06	1,50E-06

Kp' computation from the measurements								
	W=2u	W=5u	W=10u	W=15u	W=20u	W=30u	W=40u	W=50u
L=1u	1,70E-05	2,23E-05	2,42E-05	2,51E-05	2,50E-05	2,50E-05	2,56E-05	2,57E-05
L=1.5u	1,80E-05	2,39E-05	2,56E-05	2,62E-05	2,72E-05	2,69E-05	2,70E-05	2,71E-05
L=2u	1,87E-05	2,47E-05	2,68E-05	2,75E-05	2,79E-05	2,78E-05	2,87E-05	2,85E-05

Si noti che il k_p' dipende fortemente dalle variazioni di W, mentre poco dalle variazioni di L considerate. Il valore minimo si ha per W=2μm (al quale abbiamo $k_p' \approx 18\mu A/V^2$ se consideriamo il valore intermedio di L=1.5μm) mentre il valore massimo si ha per W=50μm (al quale abbiamo $k_p' \approx 27,1\mu A/V^2$).

Per W=10μm, L=1μm ho $k_p \approx 24,2\mu A/V^2$. Tale parametro di transconduttanza è di molto inferiore (scalato di circa un quarto) rispetto al parametro di transconduttanza del corrispettivo NMOS avente le stesse dimensioni, per cui avevamo trovato $k_n \approx 110\mu A/V^2$. Tale risultato è dovuto al fatto che i portatori di tipo P che formano il canale del PMOS hanno mobilità inferiore rispetto a quella dei portatori di tipo N, e dunque a parità di dimensioni NMOS e PMOS non hanno gli stessi parametri.

3.2 Estrazione del λ_p per vari valori di W, L

Utilizzando lo stesso circuito della sezione precedente, manteniamo adesso V_{sg} costante ($V_{sg} = 2V$) e facciamo variare la V_{sd} con un DC sweep.

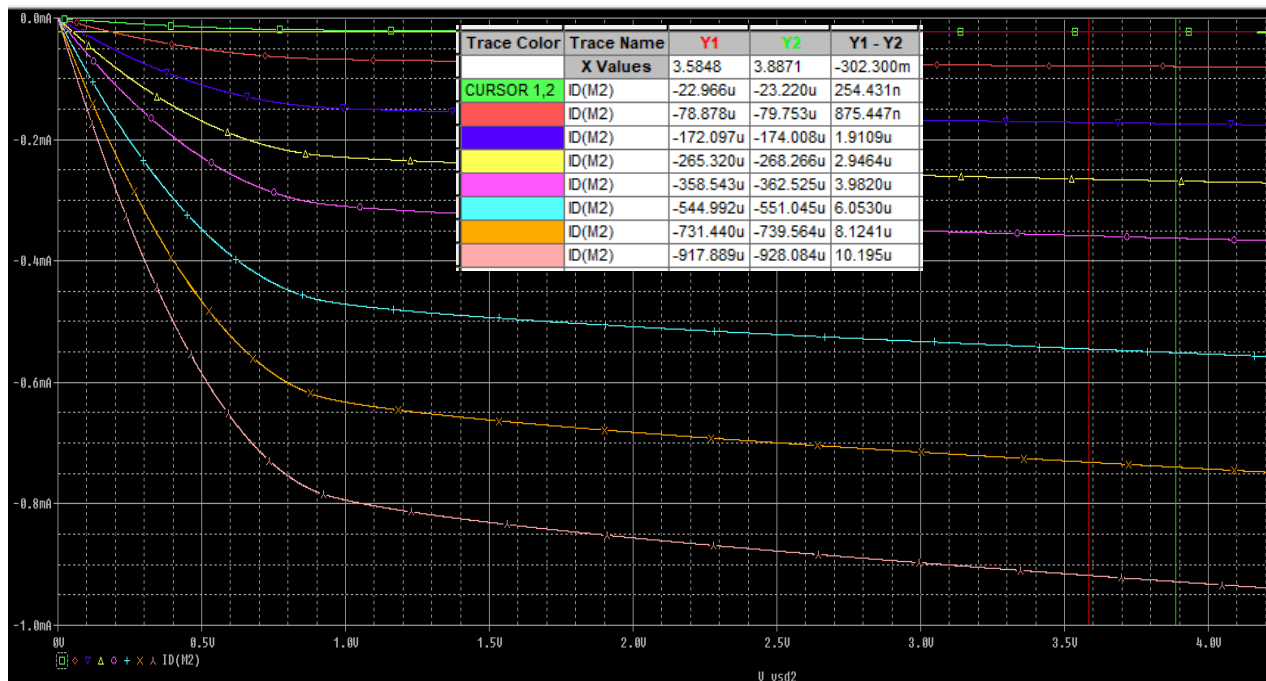
Applichiamo inoltre un parametric sweep, per far variare W nel solito range di valori discreti da noi impostati, e manteniamo $L=1\mu m$ facendolo poi variare successivamente ai valori $L=1.5\mu m$ ed $L=2\mu m$.

Traceremo così le caratteristiche $I_d(V_{sd})$, dalle quali andando ad effettuare le misure della ΔI_d e della ΔV_{sd} , potremo ricavare λ_p utilizzando la formula:

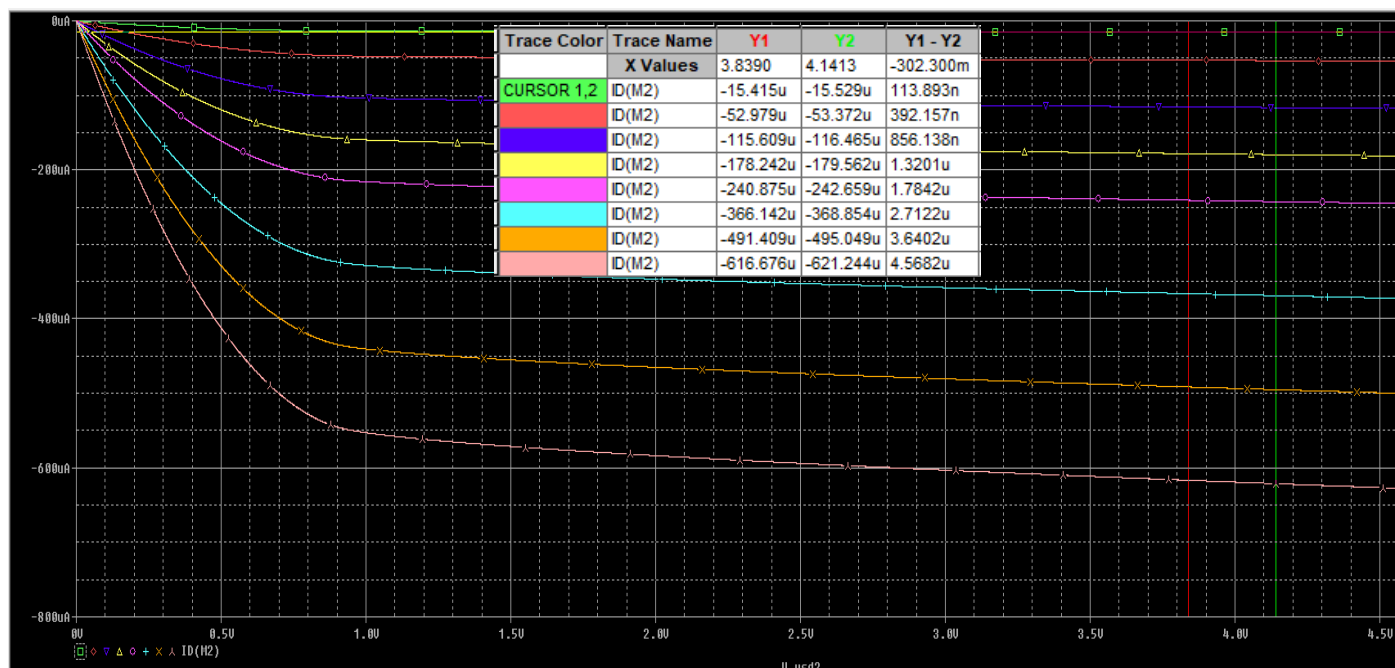
$$\lambda_p = \frac{2}{k'_p * \frac{W}{L} * (V_{sg} - |V_{tp}|)^2} \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{sd}}$$

Riporto sotto le misure effettuate sulle relative caratteristiche, e poi i calcoli eseguiti in Excel.

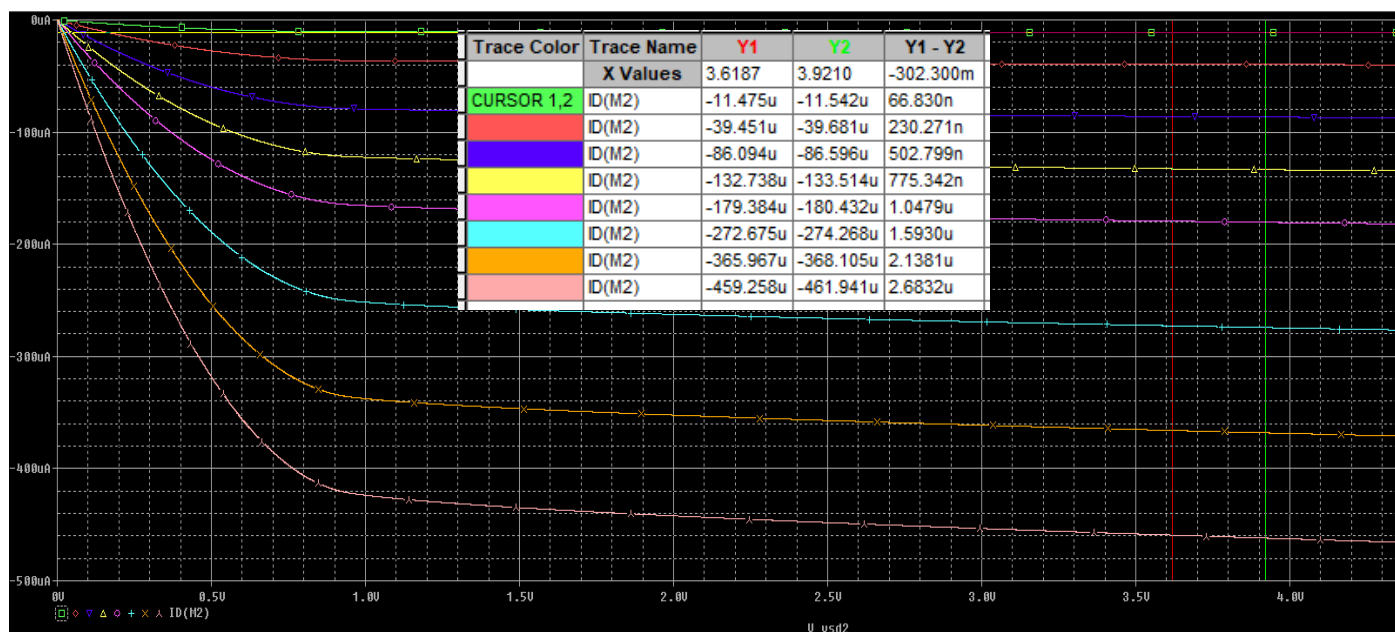
Si noti che così come le caratteristiche $I_d(V_{sg})$, anche le caratteristiche $I_d(V_{sd})$ saranno “ribaltate” rispetto a quelle dell’NMOS, in quanto la corrente I_d che entra nel drain di un PMOS è negativa (la probe di corrente misura appunto la corrente che “entra”).



Caratteristica $I_d(V_{sd})$ per $V_{sg}=2V$, $L=1\mu m$, W Sweep



Caratteristica $I_d(V_{ds})$ per $V_{gs}=2V$, $L=1.5\mu m$, W Sweep



Inseriamo ora le misure effettuate nel foglio di calcolo Excel e calcoliamo così λ_p al variare di W ed L (attenzione: $|V_{tp}|=0,81$, è leggermente più alta in modulo della V_{tn}).

Aspect Ratio W/L for different W, L values (for view purposes only)									
L	2	5	10	15	20	30	40	50	
W	1	2	5	10	15	20	30	40	50
	1,5	1,33	3,33	6,67	10,00	13,33	20,00	26,67	33,33
	2	1	2,5	5	7,5	10	15	20	25

Kp' computation from the measurements

	W=2u	W=5u	W=10u	W=15u	W=20u	W=30u	W=40u	W=50u
L=1u	1,70E-05	2,23E-05	2,42E-05	2,51E-05	2,50E-05	2,50E-05	2,56E-05	2,57E-05
L=1.5u	1,80E-05	2,39E-05	2,56E-05	2,62E-05	2,72E-05	2,69E-05	2,70E-05	2,71E-05
L=2u	1,87E-05	2,47E-05	2,68E-05	2,75E-05	2,79E-05	2,78E-05	2,87E-05	2,85E-05

Tabella misure ΔI_d per vari valori di W ed L. Per L costante, ΔV_{ds} è costante (indicato a fianco)

Vsg		2	Vtp		0,81				
L (um)	ΔV_{ds}	2	5	10	15	20	30	40	50
1	0,3371	2,54E-07	8,75E-07	1,91E-06	2,95E-06	3,98E-06	6,05E-06	8,12E-06	1,02E-05
1,5	0,3511	1,14E-07	3,92E-07	8,56E-07	1,32E-06	1,78E-06	2,71E-06	3,64E-06	4,56E-06
2	0,3511	6,68E-08	2,30E-07	5,03E-07	7,75E-07	1,05E-06	1,60E-06	2,14E-06	2,68E-06

Calcolo $\lambda_{p,d}$ dalle misure di $I_d(V_{ds})$ sopra

	L								
W		2	5	10	15	20	30	40	50
	1	3,13E-02	3,29E-02	3,31E-02	3,28E-02	3,33E-02	3,38E-02	3,32E-02	3,33E-02
	1,5	1,91E-02	1,98E-02	2,02E-02	2,02E-02	1,97E-02	2,02E-02	2,03E-02	2,03E-02
	2	1,44E-02	1,50E-02	1,51E-02	1,51E-02	1,52E-02	1,55E-02	1,50E-02	1,51E-02

Foglio Excel per il calcolo di λ_p , sweep di W, ed L fatto variare manualmente.

Si noti come anche per il PMOS, così come per l'NMOS, il parametro che fa variare molto più bruscamente il λ_p è sempre L, e non W. Si può quasi dire che, al variare di W, λ_p si mantiene quasi costante. Abbiamo:

- Per $L=1\mu\text{m}$ $\rightarrow \lambda_p \simeq 33 * 10^{-3} \text{ V}^{-1}$
- Per $L=1,5\mu\text{m}$ $\rightarrow \lambda_p \simeq 20 * 10^{-3} \text{ V}^{-1}$
- Per $L=2\mu\text{m}$ $\rightarrow \lambda_p \simeq 15 * 10^{-3} \text{ V}^{-1}$

Confrontando λ_p con i valori di λ_n dell'NMOS vediamo che a parità di dimensioni il PMOS ha un fattore di modulazione della lunghezza di canale più elevato rispetto all'NMOS. Ciò comporta che a parità di corrente di polarizzazione nel punto di lavoro I_d^Q un PMOS avrà resistenza di uscita più bassa rispetto ad un NMOS avente stessa geometria. Ciò è sempre dovuto alla diversa mobilità delle lacune (portatori nel canale P del PMOS) rispetto a quella degli elettroni (portatori nel canale N dell'NMOS).